

# Projekt KEGA

Vyučovanie fyziky programovaním modelov fyzikálnych javov  
a pomocou interaktívneho softvéru

## Elektromagnetické vlnenie



**Slavomír Tuleja**

**Humenné 2007**

---

**Autori:** RNDr. Slavomír Tuleja, PhD.

**Odborná recenzia:** RNDr. Jozef Hanč, PhD.

Preprint 2007 (L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xverzia)

Moderné informačno-komunikačné technológie a status preprintu tejto publikácie nám dovoľuje obrátiť sa s prosbou na našich kolegov, spolupracovníkov v oblasti didaktiky fyziky a nielen v nej o zaslanie svojich komentárov a názorov, resp. upozornení na zistené chyby a nedostatky.

Na základe tejto širšej spätnej väzby bude možné v časovom horizonte jeden rok a za nižších nákladov pripraviť, resp. rozšíriť tento preprint do akceptovateľnejšej a kvalitnejšej formy a obsahu v porovnaní so štandardným publikovaním. Informácie o presnom dátume prvého vydania žiadajte na emailovej adrese <stuleja@gmail.com>.

---

Gymnázium arm. gen. L. Svobodu

Humenné

© Slavomír Tuleja, 2007

Táto publikácia vznikla s príspevom grantovej agentúry MŠ SR KEGA v rámci projektov 3/3005/05 *Vyučovanie fyziky programovaním modelov fyzikálnych javov a pomocou interaktívneho softvéru.*

Všetky práva vyhradené. Žiadna časť tohto dokumentu nemôže byť žiadnym médiom reprodukována a prenášaná bez písomného súhlasu autorov. Autor bezplatne poskytne písomné dovoľenie vyhotoviť alebo distribuovať doslovný opis tohto dokumentu alebo jeho časti akýmkoľvek médiom za predpokladu, že bude zachované oznámenie o coryrighte a oznámenie o povolení a že distribútor príjemcovi poskytne povolenie na ďalšie šírenie, a to v rovnakej podobe, v akej ho dostane od autora.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Organizačná stránka</b>	<b>1</b>
1.1	Úvod . . . . .	1
1.2	Časové rozvrhnutie učiva . . . . .	1
1.3	Testy . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Učebný materiál</b>	<b>3</b>
2.1	1. hodina . . . . .	3
2.1.1	A – Záhadné elektromagnetické vlny . . . . .	3
2.1.2	B – Pole náboja v pokoji . . . . .	6
2.1.3	C – Pole náboja pohybujúceho sa konštantnou rýchlosťou . . . . .	8
2.1.4	D – Všeobecné vlastnosti siločiar . . . . .	10
2.1.5	E – Maximálna rýchlosť šírenia sa informácií . . . . .	10
2.2	2. a 3. hodina . . . . .	12
2.2.1	F – Vznik elektromagnetického pulzu . . . . .	12
2.2.2	G – Kedy vznikajú elektromagnetické vlny? . . . . .	18
2.2.3	H – Intenzita elektrického poľa elektromagnetického pulzu . . . . .	22
2.3	4. hodina . . . . .	24
2.3.1	I – Odvodenie vzťahu pre veľkosť intenzity poľa elektromagnetického pulzu . . . . .	24
	<b>Literatúra</b>	<b>28</b>

# Kapitola 1

## Organizačná stránka

### 1.1 Úvod

Učebný materiál *Elektromagnetické vlnenie* som vytvoril ako alternatívu k jestvujúcim gymnaziálnym výkladom elektromagnetického vlnenia v starej učebnici pre tretí ročník [1] a v novej učebnici fyziky pre štvrtý ročník [2]. Samotný učebný materiál je prístupný vo formáte html [3] ako súčasť mojich webových stránok [4]. Súčasťou učebného materiálu je aplikácia, ktorú som naprogramoval v programovacom jazyku *Java* a ktorú študenti využijú pri samostatnej práci na počítačoch.

Spomínaný učebný materiál sa zaoberá vysvetlením vzniku a vlastností elektromagnetického žiarenia vytvoreného zrýchleným pohybom nabitých častíc. S postupom, ktorý v tomto materiále využívam, som sa stretol v knihe Johna Archibalda Wheelera [5] a tiež v článku v *American Journal of Physics* od H. Ohaniana [6].

### 1.2 Časové rozvrhnutie učiva

Učivo o elektromagnetickom vlnení, ktoré je súčasťou tohoto materiálu, je rozvrhnuté do *štyroch* vyučovacích hodín.

Prvá hodina prebieha s celou triedou (zhruba 36 žiakov), nasledujúce dve prebiehajú s polovicou triedy v počítačovom laboratóriu v rámci delenej hodiny určenej na laboratórne cvičenia z fyziky. Posledná hodina prebieha znovu s celou triedou. V počítačovom laboratóriu by malo byť toľko počítačov, aby pri jednom počítači sedeli najviac dvaja žiaci.

Na všetkých štyroch hodinách je vhodné, ak je k dispozícii laptop alebo stolový počítač pre učiteľa a dataprojektor.

### 1.3 Testy

Materiál, ktorý preberieme so žiakmi na prvej, spoločnej hodine nevyžaduje priame použitie počítačov študentmi. Hodina má preto formu prednášky. Táto hodina pripraví žiakov na samostatnú prácu s počítačom na nasledujúcej dvojhodinovke na cvičení. Aby sa zvýšila zapojenosť žiakov do diania, je výklad prerušovaný *testovacími otázkami* na získanie okamžitej spätnej väzby od žiakov.

Pri tomto testovaní používam na získanie okamžitej spätnej väzby od žiakov farebné hlasovacie háčky.

Každá testovacia otázka je kvalitatívna s výberom jedinej možnej správnej odpovede, pričom sa týka práve prebranej dávky učiva. Otázku premietnem na dataprojektore. Študenti odpovedajú všetci na túto otázku z miesta, pričom zdvihnú farebný hárok papiera veľkosti A4 na ktorom je napísané písmeno A, B, C alebo D. Každému písmenu prislúcha iná farba papiera: červená, zelená, modrá a žltá. Každému študentovi sú tieto háčky na začiatku hodiny pridelené. Ja a aj študenti pritom veľmi ľahko pohľadom odhadneme, koľko percent prítomných volilo tú ktorú odpoveď.

Po tomto prvom hlasovaní dám študentom dve minúty na to, aby sa o svojej odpovedi porozprávali so svojimi najbližšími susedmi. Po uplynutí dvoch minút sa hlasuje znovu. Zvyčajne vedie dvojminútová diskusia medzi študentami k výraznému zvýšeniu počtu študentov, ktorí si vybrali správnu odpoveď. Ak však k tomu nedôjde, musím sa vrátiť a vysvetliť dávku učiva podrobnejšie.

Tieto testové otázky sú zaradené aj do materiálu, ktorý preberieme na dvojhodinovom počítačovom cvičení.

## Kapitola 2

# Učebný materiál Elektromagnetické vlnenie

V tejto kapitole uvádzam skoro<sup>1</sup> úplný text učebného materiálu. Marginálne komentáre obsahujú stručné metodické poznámky k spôsobu odučenia danej časti materiálu.

### 2.1 1. hodina

#### 2.1.1 A – Záhadné elektromagnetické vlny

Sú všade okolo nás. Sú neviditeľné a lietajú všetkými možnými smermi. Niektoré cez nás bez problémov prejdú. Iné nie. Na svoj pohyb nepotrebujú látkové prostredie. Stačí im prázdny priestor. Šíria sa tak rýchlo, že za sekundu by obehli zemeguľu sedem krát. Ich rýchlosť je najväčšia možná rýchlosť v prírode. Preto sú pre človeka vhodným médiom na šírenie správ. Elektromagnetické vlny — rozruchy v elektrickom a magnetickom poli putujúce priestorom rýchlosťou svetla.

Ich história je zaujímavá. Ešte predtým ako ich človek dokázal vyrobiť a zaregistrovať, dokázal predpovedať ich existenciu. V roku 1873 škótsky fyzik **James Clerk Maxwell** z Cambridge University publikoval matematickú prácu, v ktorej zhrnul všetky dovtedajšie poznatky o elektrine a magnetizme do štyroch rovníc. Tieto štyri rovnice popisovali všetky dovtedy známe elektrické a magnetické javy. Ale dokázali aj čosi viac. *Predpovedali* aj nové javy. Maxwell bol vynikajúci matematik a tak veľmi rýchlo prišiel na to, že dôsledkom jeho rovníc je, že by sa priestorom mali môcť šíriť rozruchy v elektrickom a magnetickom poli. Nazval ich elektromagnetické vlny. Dovtedy nikto takéto vlny experimentálne nepozoroval.

<sup>1</sup>Tento prepis neobsahuje *rozširujúci materiál* a navyše, zo zrejmých dôvodov neobsahuje animované gif obrázky, ktoré si možno pozrieť len na webe [3].

Prebieha s celou triedou.

Túto časť prezentujeme formou výkladu.



Obr. 2.1: James Clerk Maxwell (1831 - 1879)

Pomocou svojich rovníc vedel predpovedať aj ich rýchlosť. Vyšlo mu, že by mala byť

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}},$$

kde  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  je permitivita vákua a  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$  je permeabilita vákua. Hodnota, ktorú získal po dosadení bola prakticky rovnaká ako bola vtedy známa experimentálna hodnota rýchlosti svetla. To ho viedlo k domnienke, že aj svetlo môže byť elektromagnetické vlnenie.

### Úloha A1 – Rýchlosť svetla

Dosaďte do vzorca, ktorý pre rýchlosť svetla získal Maxwell a overte, či hodnota, ktorá vám vyjde, zodpovedá rýchlosti svetla. Overte tiež, či je rovnica pre výpočet rýchlosti svetla jednotkovo homogénna.

Dnes vieme, že elektromagnetické vlny sa navzájom líšia svojou vlnovou dĺžkou. Svetlu zodpovedá len malý rozsah vlnových dĺžok od 380nm po 780nm. Vlny s vlnovými dĺžkami mimo tento rozsah sú oku neviditeľné a nie sú svetlom, ale niečím iným. V roku 1886 nemecký fyzik **Heinrich Hertz** takéto vlny vygeneroval a tiež experimentálne zachytil. Jeho vlny mali vlnovú dĺžku spadajúcu do oblasti, ktorú dnes nazývame rádiová oblasť.

Napokon, v roku 1895 zrealizoval **Guglielmo Marconi** prvý bezdrôtový telegrafický prenos a v roku 1901 vyslal a prijal prvý transatlantický signál. Dnes, zhruba o storočie neskôr, používame elektromagnetické vlny na prenos



Obr. 2.2: Heinrich Hertz (1857 - 1894)



Obr. 2.3: Guglielmo Marconi (1874 - 1937)



rozhlasového a televízneho vysielania, bezdrôtového internetu, signálu mobilných telefónov a satelitného vysielania. Využívajú ich niektoré diaľkové ovládania, policajné radary, GPS a dokonca aj mikrovlnné rúry. Život bez nich by bol dnes omnoho zložitejší.

Tieto vlny sú pritom veľmi zvláštne. Vznikajú vtedy, keď sa elektrický náboj pohybuje špeciálnym spôsobom. Konkrétne vtedy, keď mení svoju rýchlosť. Ak je v pokoji alebo keď sa pohybuje konštantnou rýchlosťou, tak vlny nevytvára. **Prečo je to tak?**

Veľmi dobre sa šíria do diaľky. Na rozdiel od elektrického poľa kladného náboja, ktorého intenzita klesá s druhou mocninou vzdialenosti od náboja, klesá intenzita elektrického poľa elektromagnetickej vlny len s prvou mocninou vzdialenosti od náboja. To znamená, že ak sa s prístrojom registrujúcim intenzitu elektrického poľa vzdialime od zrýchľujúceho náboja desať krát ďalej ako sme teraz, klesne intenzita elektrického poľa vlny len desať krát. Nie sto krát, ako by to bolo v prípade poľa obyčajného elektrického náboja v pokoji! **Prečo?**

Je tu ešte jedna zvláštna vec. Ak sa nachádzame v istej vzdialenosti od kladného elektrického náboja, ktorý je zdrojom elektrického poľa, zistíme, že vektor intenzity elektrického poľa má smer od náboja k nám. Na rozdiel od toho vektor intenzity elektrického poľa vlny *je kolmý* na smer od náboja k detektoru (pozri Obrázok 2.4)! Navyše sa s časom mení a smeruje raz hore a raz dole. Na také niečo nie sme zvyknutí. **Prečo je kolmý?**



Obr. 2.4: Vektor intenzity elektrického poľa vlny má smer kolmý k smeru šírenia sa vlny.

Na tieto otázky budeme hľadať odpovede na nasledujúcich stránkach. Keďže to zďaleka nie sú jednoduché otázky, musíme sa na ne veľmi dobre pripraviť. Túto prípravu začneme hneď na nasledujúcej stránke tým, že si zopakujeme základné fakty o elektrostatickom poli kladného náboja.

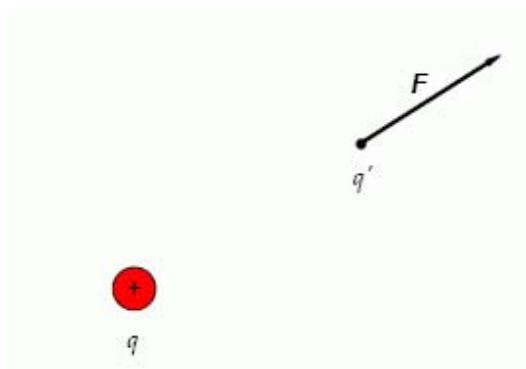
### 2.1.2 B – Pole náboja v pokoji

Z učiva o elektrostatike už viete, že v priestore v okolí kladného elektrického

Táto časť je dôležitá. Formulujú sa tu otázky, na ktoré budú žiaci po preštudovaní materiálu vedieť odpovedať.

Túto časť prezentujeme formou výkladu.

náboja  $q$  je *niečo*, čo sa prejavuje tak, že ak vezmeme veľmi malý skúšobný náboj  $q'$  a umiestnime ho do nejakého bodu tohto priestoru, bude naň pôsobiť elektrická sila  $\vec{F}$ . Toto *niečo* sme nazvali elektrické pole (pozri Obrázok 2.5).



Obr. 2.5: Pole v okolí náboja  $q$  sa prejavuje tak, že na skúšobné náboje  $q'$  v okolí náboja  $q$  pôsobí elektrická sila.

Pôsobiacia sila  $\vec{F}$  je tým väčšia, čím väčší je náš skúšobný náboj  $q'$ . Matematicky sa to dá zapísať ako priama úmernosť

$$\vec{F} = \vec{E}q',$$

kde  $\vec{E}$  je vektorová konštanta úmernosti a predstavuje silu, ktorá by pôsobila na jednotkový skúšobný náboj. Vektor  $\vec{E}$  možno vyjadriť ako  $\vec{E} = \vec{F}/q'$ . Vektor  $\vec{E}$  nazývame intenzita elektrického poľa.

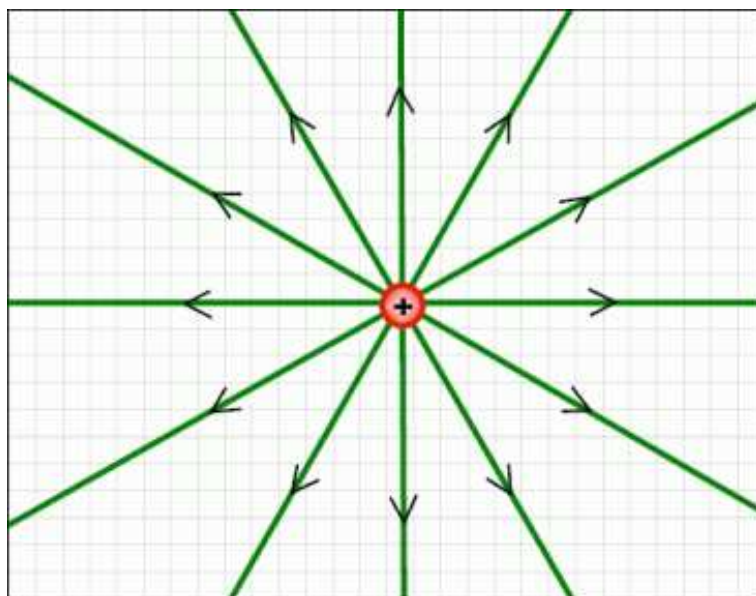
Vieme, že vektory intenzity elektrického poľa v tomto prípade smerujú od kladného náboja a ich veľkosť klesá so štvorcom vzdialenosti od náboja. Pre veľkosť intenzity tohto poľa možno z Coulombovho zákona získať vzťah:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2}$$

Zo vzorca je vidieť, že čím ďalej sa od kladného náboja nachádzame, tým je intenzita poľa menšia. Ak sa napríklad vzdialenosť  $r$  zväčší 2 krát, intenzita klesne  $2^2 = 4$  krát, lebo v menovateli vzorca je  $r^2$ . Intenzita poľa teda klesá veľmi rýchlo. Pri veľkých vzdialenostiach od kladného náboja môže byť taká malá, že bude našimi prístrojmi nemerateľná.

Elektrické pole kladného náboja môžeme znázorniť pomocou siločiar, ktoré majú tú vlastnosť, že ich dotyčnica v ľubovoľnom bode siločiar vždy udáva smer intenzity elektrického poľa v tomto bode.

Obrazec siločiar elektrického poľa kladného náboja môžeme v princípe získať aj takto: Rovnomerne rozmiestnime do celého priestoru množstvo skúšobných nábojov  $q'$  a odmeriame silu, ktorá na ne pôsobí. Z nej určíme



Obr. 2.6: Pole v okolí náboja  $q$  znázornené pomocou elektrických siločiar.

podľa vzťahu  $\vec{E} = \vec{F}/q'$  vektor intenzity v každom bode, kde máme umiestnený skúšobný náboj. Skúšobné náboje volíme naschvál veľmi malé, aby sa navzájom neovplyňovali.

Potom vektory pospájame čiarami v smere vektorov. Obrázec siločiar ktorý získame je znázornený na Obrázku 2.6.

### 2.1.3 C – Pole náboja pohybujúceho sa konštantnou rýchlosťou

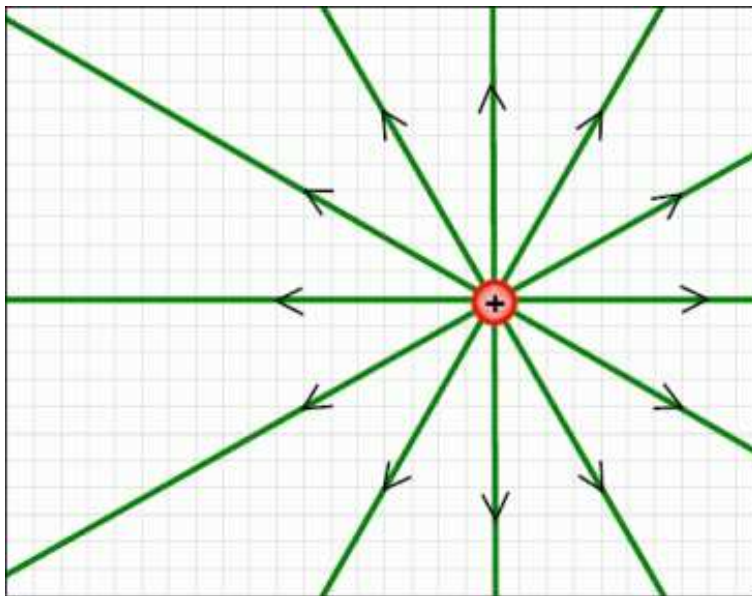
To, čo sme povedali o intenzite elektrického poľa kladného náboja  $q$  doteraz, platí keď sa náboj nachádza v pokoji. Ako bude vyzeráť elektrické pole náboja  $q$ , keď sa voči nám bude pomaly pohybovať po vodorovnej priamke konštantnou rýchlosťou?

Je veľmi rozumné predpokladať, že **kladný náboj, ktorý sa voči nám pohybuje rovnomerným pohybom po priamke, unáša so sebou svoj obrazec siločiar. Intenzita elektrického poľa naďalej klesá s druhou mocninou vzdialenosti od aktuálnej polohy náboja.** Vyzerá to tak, ako na animácii na Obrázku 2.7.

Ak chcete vedieť *prečo* takýto predpoklad rozumný, kliknite sem<sup>2</sup> a nájdete vysvetlenie.

Túto časť prezentujeme formou výkladu.

<sup>2</sup>Tento link funguje len na stránke [3] a odkazuje na rozširujúci materiál, ktorý na hodine nepreberáme. Necháme na študentoch so záujmom, aby si ho pozreli.



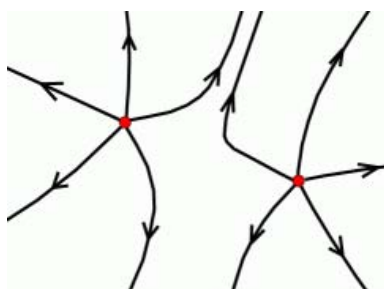
Obr. 2.7: Animácia elektrického poľa náboja  $q$ , ktorý sa rovnomerne pohybuje po vodorovnej osi  $x$ . Animácia sa automaticky neustále opakuje. Z technických dôvodov je možné animáciu vidieť v pohybe len na webových stránkach [3], nie v tomto dokumente.

### 2.1.4 D – Všeobecné vlastnosti siločiar

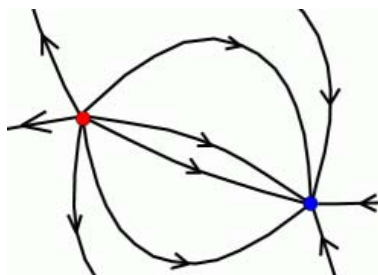
#### Test D1

Na nasledujúcich štyroch obrázkoch sú znázornené náboje a ich elektrické polia. Pritom kladné náboje sú označené červeným krúžkom, záporné modrým. Nesprávne je/sú

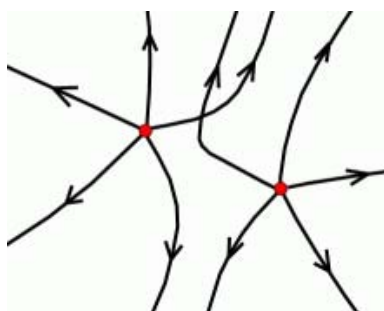
Táto časť slúži na zopakovanie dvoch faktov: toho, že elektrické siločiar sa nemôžu pretínať a toho, že musia byť nepretržené, ak nie je v priestore náboj.



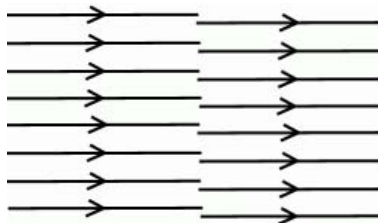
pole A



pole B



pole C



pole D

- a) len pole C
- b) len pole D
- c) len polia C a D
- d) len polia A a B

### 2.1.5 E – Maximálna rýchlosť šírenia sa informácií

Na začiatku 20. storočia vytvoril mladý nemecký fyzik Albert Einstein špeciálnu teóriu relativity. Jedným z jej známych výsledkov je to, že **žiadna informácia sa v prírode nemôže z jedného miesta na iné pohybovať väčšou rýchlosťou ako je rýchlosť svetla vo vákuu.**

V tejto časti použijú žiaci fakt, že informácie sa nemôžu šíriť väčšou rýchlosťou ako  $c$  pri ľahko predstaviteľnej situácii. Neskôr budú musieť využiť ten istý princíp pre siločiar.

**Test E1**

Na povrchu Marsu sa nachádza automatický robot Mars rover, ktorý je zatiaľ v pokoji. Po povrchu sa môže pohybovať rýchlosťou 5 metrov za minútu. Po analýze záberov z kamery robota pripravilo na tento deň stredisko kozmických letov pre robota jednoduchú úlohu. Má prejsť od balvana s pracovným menom *Alice*, pri ktorom sa práve nachádza, k inému balvanu, pomenovanému pracovne *Bob*, ktorý sa nachádza vo vzdialenosti 600 metrov od robota. Zem a robot majú zosynchronizovaný čas. Robotu bola už skôr na diaľku zaslaná úloha, aby vyštartoval o 10:00.



Presne v čase 10:00 sa dá robot do pohybu. Inžinieri na Zemi majú nepretržité spojenie s robotom a neustále sledujú obraz z kamery robota. Mars je od Zeme práve vzdialený 10 svetelných minút.

Je tu však čosi, čo si inžinieri v stredisku kozmických letov pri analýze záberu z kamery nevšimli. Presne v strede cesty medzi balvanmi *Alice* a *Bob* je v inak rovnom povrchu Marsu miesto s pohyblivým pieskom. Robot pri prechode cez toto miesto zaviazne a k balvanu *Bob* nedôjde. Ktoré z nasledujúcich tvrdení je *nesprávne*?

- V čase 10:10 *vedia* inžinieri v stredisku kozmických letov, že robot vyštartoval od balvanu *Alice*.
- V čase 11:00 *predpokladajú* inžinieri na Zemi, že ak sa nič *nepokazilo*, tak je už robot v polovici cesty k balvanu *Bob*.
- Ak by v čase 11:00 zbadali inžinieri v stredisku kozmických letov na zábere z kamery, že robot sa blíži k oblasti s pohyblivým pieskom, tak *by mohli* ešte robot na diaľku zastaviť a tak ho zachrániť.
- Ak by v čase 10:50 zbadali inžinieri v stredisku kozmických letov na zábere z kamery, že robot sa blíži k oblasti s pohyblivým pieskom, tak *by mohli* ešte robot na diaľku zastaviť a tak ho zachrániť.

V tomto okamihu je naša príprava na zoznámenie sa s elektromagnetickým vlnením na konci. V ďalšej časti sa budeme zaoberať vznikom a vlastnosťami elektromagnetického pulzu, čo je špeciálny typ elektromagnetickej vlny.

## 2.2 2. a 3. hodina

### 2.2.1 F – Vznik elektromagnetického pulzu

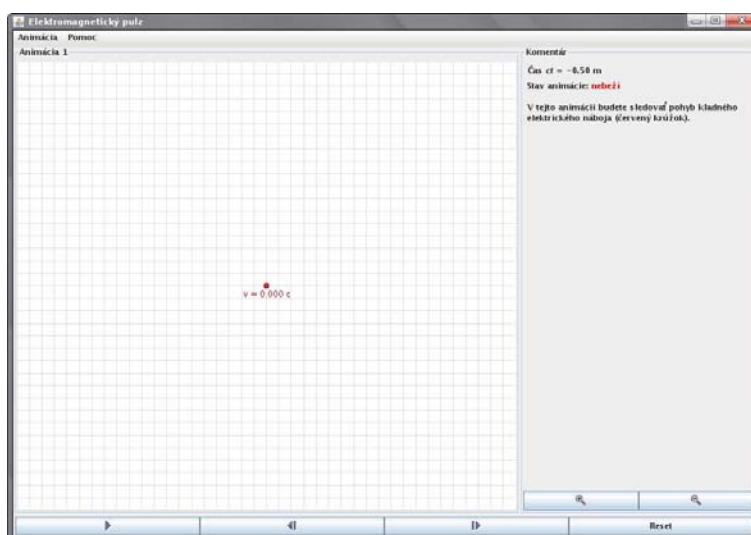
Na tejto stránke sa nachádza elektronický odpoveďový hárok, do ktorého budete zadávať svoje odpovede na otázky, ktoré nájdete nižšie. Keď ho budete mať celý vyplnený, bude jeho obsah zaslaný na email vyučujúceho<sup>3</sup>.

Na sérii šiestich na seba nadväzujúcich animácií teraz pomocou jednoduchého Java programu *Elektromagnetický pulz* preskúmate vznik elektromagnetického pulzu, ktorý je špeciálnym jednoduchým prípadom elektromagnetickej vlny. Konkrétne sa budete zaoberať tým, aký vplyv má na siločiaru elektrického poľa náboja to, keď náboj zmení rýchlosť.

Stiahnite si na plochu program *Elektromagnetický pulz*. Spustíte ho dvojklikom na ikonu súboru *ElektromagnetickyPulz.jar*.

Prebieha s polovicou triedy v multimedialnej učebni.

V tejto časti začína samotná práca s programom. Je dobré ak vždy celá skupina rieši tú istú úlohu. Ak ju majú všetci hotovú, pokračuje sa ďalšou úlohou. Učiteľ obieha dvojice žiakov pri počítačoch a priebežne kontroluje ich činnosť. Ak je to potrebné, robí úlohu aj on na dataprojektore.



Obr. 2.8: Okno, ktoré sa objaví po spustení programu *Elektromagnetický pulz*.

#### *Rady a tipy pre prácu s programom*

V pravej časti okna programu nájdete informáciu o tom, čo sa práve deje v animácii. Animácia sa bude v dôležitých okamihoch automaticky prerušovať. Vtedy je potrebné stlačiť tlačidlo **POKRAČOVAŤ**.

<sup>3</sup>Toto znovu funguje len na webovej stránke. Žiaci postupne počas cvičenia hárok vyplnia. Počítač potom z neho vygeneruje protokol s odpoveďami, ktorý sa odošle na učiteľov email a aj žiaci si ho môžu uchovať.

*Meranie času v programe*

Keďže deje, ktoré animácia zobrazuje, sú extrémne rýchle, nie je vhodné merať čas v animácii v sekundách. Namiesto toho využijeme trik, ktorý používajú fyzici veľmi často. Namiesto času  $t$  budeme hovoriť o čase  $ct$ , ktorý vznikne vynásobením času  $t$  rýchlosťou svetla vo vákuu,  $c$ . Veličina  $ct$  vychádza v metroch. To nie je náhoda. Predstavuje vlastne dráhu, ktorú svetlo prejde za čas  $t$ . Ak napríklad vieme, že  $ct = 3$  m, máme celkom konkrétnu predstavu o čase  $t$ , ktorý je v tomto prípade taký čas, ktorý potrebuje svetlo na prejdanie dráhy 3 m. Ak by sme povedali, že  $t = 1,001 \cdot 10^{-8}$  s, bolo by to omnoho menej výstižné.

*Meranie rýchlosti v programe*

Okamžitú rýchlosť náboja uvádza program vždy pod nábojom ako násobok rýchlosti svetla  $c$  vo vákuu. Napríklad údaj, že rýchlosť náboja je  $v = 0,15c$  znamená, že náboj mal rýchlosť rovnú 15% rýchlosti svetla, teda  $v = 45 \cdot 10^6$  m/s.

*Meranie polohy v programe*

Polohu bodu pod kurzorom myši v tvare krížika môžete odčítať v ľavom dolnom rohu okna programu. Ak chcete merať presnejšie, použite tlačidlá na ktorých sú nakreslené zväčšovacie sklá. Pomocou nich si môžete scénu zväčšiť alebo zmenšiť.

**Úloha F1 – Práca s programom: Animácia 1**

Spusťte animáciu a sledujte pozorne jednotlivé fázy pohybu kladného náboja. Zastavte ju v čase  $ct = 1,10$ m. Ak ste si istí, že máte prehľad čo náboj robil, doplňte nasledujúce vety. Ak nie, stlačte RESET a spusťte animáciu znovu, pokým si nebudete istí.

Animácia začala v čase  $ct =$   m.

Náboj mal až po čas  $ct = 0$  rýchlosť  $v_1 =$    $c$ .

Od času  $ct =$   m až po čas  $ct =$   m náboj menil rýchlosť (zrýchľoval).

Na konci zrýchľovania v čase  $ct =$   m mal náboj rýchlosť  $v_2 =$    $c$ .

Od času  $ct =$   m sa náboj pohyboval ďalej už len rovnomerne rýchlosťou  $v_2 =$    $c$ .

Ikona zobrazujúca šálku kávy bude označovať aktivity s Java programom.

Žiaci dopĺňajú odpovede do elektronického odpovedového hárka, ktorý majú v prehliadači otvorený v osobitnej karte alebo v osobitnom okne.

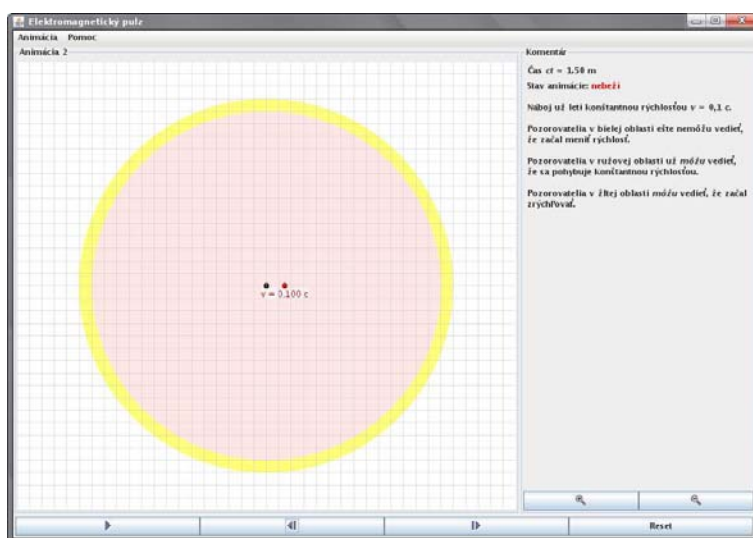




### Úloha F2 – Práca s programom: Animácia 2

Začiatok zrýchľovania a koniec zrýchľovania sú dve udalosti zo života náboja, o ktorých *nevedia hneď* všetci pozorovatelia v priestore. Začiatok zrýchľovania sa odohral v počiatku sústavy súradníc a koniec zrýchľovania veľmi blízko k tomuto bodu. Informácia o týchto udalostiach sa z miest, kde sa stali, môže šíriť nanajvýš rýchlosťou svetla.

Podľa toho, či pozorovatelia v priestore už *mohli získať* informáciu o začiatku a konci zrýchľovania, sa priestor rozdelí na tri *myslené* oblasti. V tejto animácii počítač tieto oblasti priestoru zobrazí farebne.



Obr. 2.9: Animácia 2 v čase  $ct = 1,59$  m. Priestor je rozdelený na tri oblasti podľa toho, čo môžu vedieť pozorovatelia v nich o rýchlosti náboja.

Spusťte animáciu. Sledujte pozorne komentár na pravej strane. Zastavte animáciu v čase  $ct = 1,1$  m. Odpovedzte písomne na nasledujúce otázky:

1. Prečo majú hranice medzi oblasťami kružnicový tvar?
2. Aký je vonkajší polomer žltej oblasti? Skúste to predpovedať a potom si svoju predpoveď overte meraním pomocou kurzora myši a údajov o jeho polohe v ľavom dolnom rohu animácie.
3. Aký je vnútorný polomer žltej oblasti? Prečo práve toľko?
4. Prečo pozorovatelia v bielej oblasti ešte nemôžu o náboji vedieť, že začal meniť rýchlosť?
5. Prečo pozorovatelia v ružovej oblasti už môžu o náboji vedieť, že prestal meniť rýchlosť a pohybuje sa konštantnou rýchlosťou?

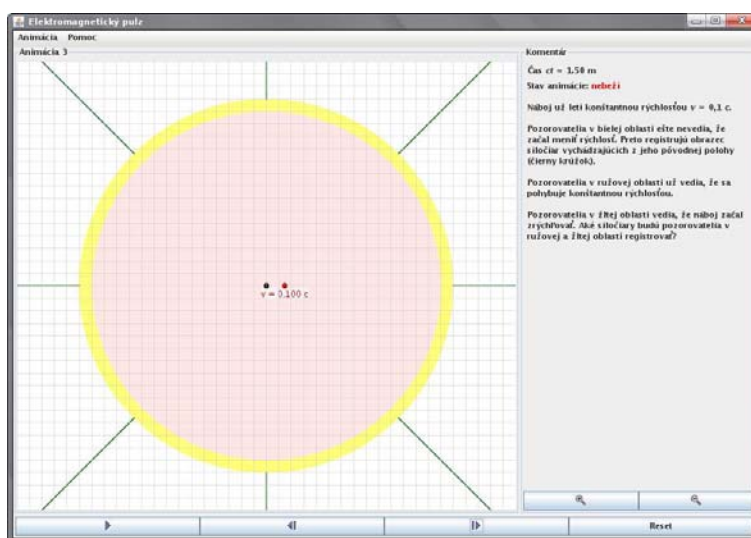
6. Prečo pozorovatelia v žltej oblasti už môžu o náboji vedieť, že začal meniť rýchlosť?

Pozor! V ďalších úvahách **budeme predpokladať že informácia sa nielen môže šíriť rýchlosťou svetla, ale že rozruchy v elektrickom poli sa ňou skutočne šíria**. Tento predpoklad je opodstatnený a vychádza z Maxwellových rovníc.



### Úloha F3 – Práca s programom: Animácia 3

V tejto animácii sa pozrieme na to, ako vyzerajú elektrické siločiarly nášho náboja vo vonkajšej, bielej oblasti.



Obr. 2.10: Animácia 3 v čase  $ct = 1,50$  m. Znázornené sú siločiarly elektrického poľa vo vonkajšej bielej oblasti, v ktorej ešte pozorovatelia nemôžu vedieť o tom, že náboj začal meniť rýchlosť.

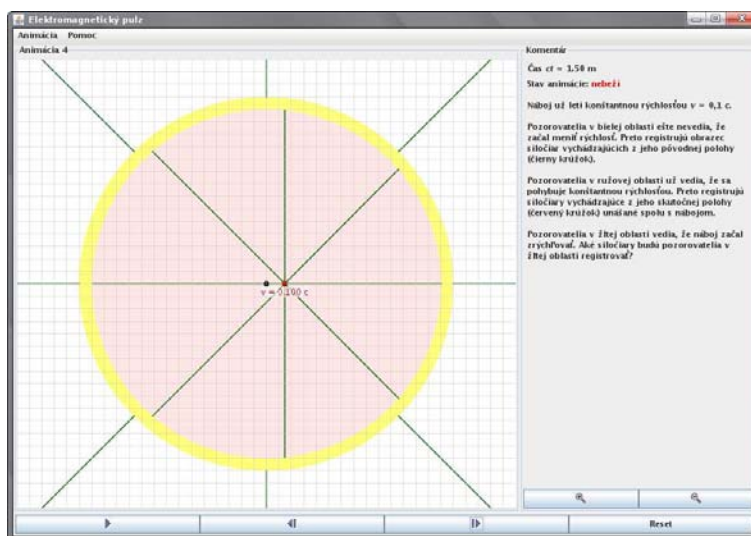
Spusťte animáciu a pozorne prejdite cez všetky jej fázy. Zastavte ju v čase  $ct = 1,10$  m. Potom odpovedzte na nasledujúcu otázku:

1. Prečo pozorovatelia v bielej oblasti registrujú elektrické siločiarly identické so siločiarlami náboja v pokoji?



### Úloha F4 – Práca s programom: Animácia 4

V tejto animácii sa pozrieme na to, ako vyzerajú elektrické siločiarly nášho náboja vo vnútornej, ružovej oblasti.



Obr. 2.11: Animácia 4 v čase  $ct = 1,50$  m. Znázornené sú siločiar elektrického poľa vo vonkajšej bielej oblasti, v ktorej ešte pozorovatelia nemôžu vedieť o tom, že náboj začal meniť rýchlosť, a vo vnútornej, ružovej oblasti, v ktorej už pozorovatelia vedia, že sa náboj pohybuje novou rýchlosťou.

Spusťte animáciu a pozorne prejdite cez všetky jej fázy. Zastavte ju v čase  $ct = 1,10$  m. Potom odpovedzte na nasledujúcu otázku:

1. Prečo pozorovatelia v ružovej oblasti registrujú pohybujúci sa obrazec elektrických siločiar, ktoré vychádzajú z pohybujúceho sa náboja? Vedia už o tom, že náboj sa pohybuje?

Ak sa teraz pozorne pozriete na obrazec siločiar, ktoré zobrazil program v čase  $ct = 1,10$  m, zistíte, že čosi nie je v poriadku. Posúďte, či je vzniknutý tvar elektrických siločiar fyzikálne možný. V čom je problém? Ako ho navrhujete vyriešiť?

Program zatiaľ zámerne nevykreslil siločiar vnútri žltej oblasti. Aké by mohli byť?

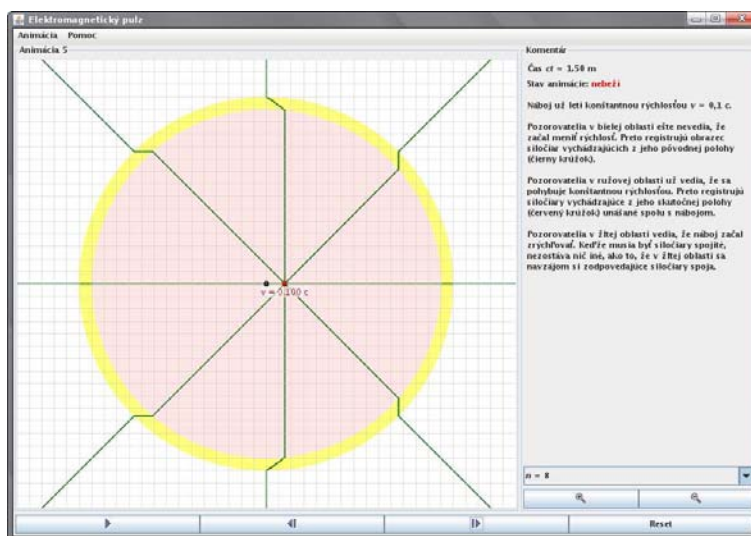
Svoje hypotézy si overíte na nasledujúcej animácii.



### Úloha F5 – Práca s programom: Animácia 5

V tejto animácii nám program zobrazí, ako vyzerajú kompletne elektrické siločiar nášho náboja vo všetkých oblastiach priestoru. Overíte si, či boli vaše hypotézy z predchádzajúcej animácie správne.

Spusťte animáciu a pozorne prejdite cez všetky jej fázy. Zastavte ju v čase  $ct = 1,10$  m. Potom odpovedzte na nasledujúcu otázku:



Obr. 2.12: Animácia 5 v čase  $ct = 1,50$  m. Znázornené sú siločiar elektrického poľa v celom priestore. Toto je tvar elektrického poľa elektromagnetického pulzu.

1. Prečo nemohli zostať siločiar v žltej oblasti rozpojené? Prečo sa museli spojiť?

Takto vyzerá elektrické pole elektromagnetickej vlny pulzného charakteru. **Evidentne sa všetkými smermi z jedného miesta šíri rozruch v tvare siločiar elektrického poľa.**

Teraz zmeňte vpravo dole počet siločiar, ktoré program vykresľuje. Skúste zadať inú hodnotu, napríklad  $n = 20$  a pozrite si celú animáciu znovu.

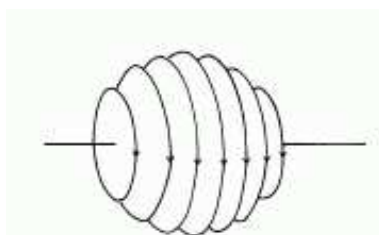
Všimnite, že väčšina siločiar je v čase  $ct = 1,10$  m narušená tak, že nie sú rovné, ale obsahujú v sebe *kľučku*. Veľkosť kľučky nie je u všetkých siločiar rovnaká. Odpovedzte na otázku:

2. V ktorom smere sú elektrické siločiar narušené najviac? V ktorých smeroch nie sú vôbec narušené?

### Prečo hovoríme o elektromagnetickej a nie o elektrickej vlne?

Maxwellove rovnice pre elektromagnetizmus predpovedajú, že všade tam, kde sa s časom mení elektrické pole, musí vzniknúť magnetické pole. Elektromagnetický pulz je vlastne časovo sa meniace elektrické pole. Preto budú v priestore okolo náboja aj magnetické indukčné čiary. Pomocou podrobnejšieho rozboru

[6] s využitím Maxwellových rovníc možno zistiť ich tvar a aj ďalšie detaily. To, čo je pre nás dôležité, je, že magnetické pole pri úvahách o elementárnych vlastnostiach elektromagnetického pulzu nepotrebujeme. Stačí ak si uvedomíme, že existuje a že je vnútorne previazané s elektrickým poľom. Pre zaujímavosť uvádzame obrázok magnetických indukčných čiar prechádzajúcich žltou oblasťou elektromagnetického pulzu v našom programe. Tvoria ho uzavreté slučky okolo priamky po ktorej sa pohybuje náboj, znázornené na nasledujúcom obrázku.



### 2.2.2 G – Kedy vznikajú elektromagnetické vlny?



#### Úloha G1 – Práca s programom: Animácia 6

Táto animácia je zovšeobecnením predchádzajúcej animácie. Preskúmate na nej prípad, keď začiatočná rýchlosť náboja nie je nulová. Náboj sa v nej bude na začiatku pohybovať doľava.

Spusťte animáciu a sledujte pozorne jednotlivé fázy pohybu náboja. Zastavte ju v čase  $ct = 1, 10m$ . Ak ste si istí, že máte prehľad čo náboj robil, doplňte nasledujúce vety.

Animácia začala v čase  $ct = \boxed{\phantom{000}}$  m.

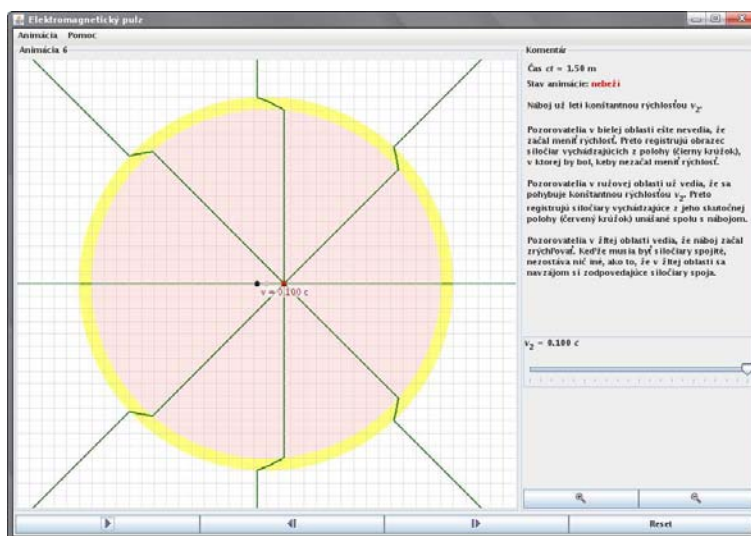
Náboj mal až po čas  $ct = 0$  rýchlosť  $v_1 = \boxed{\phantom{000}}$  c.

Od času  $ct = \boxed{\phantom{000}}$  m až po čas  $ct = \boxed{\phantom{000}}$  m náboj menil rýchlosť (zrýchľoval).

Na konci zrýchľovania v čase  $ct = \boxed{\phantom{000}}$  m mal náboj rýchlosť  $v_2 = \boxed{\phantom{000}}$  c.

Od času  $ct = \boxed{\phantom{000}}$  m sa náboj pohyboval ďalej už len rovnomerne rýchlosťou  $v_2 = \boxed{\phantom{000}}$  c.

Ďalej odpovedzte na nasledujúce otázky:



Obr. 2.13: Animácia 6 v čase  $ct = 1,50$  m. Znovu sú znázornené siločiar elektrického poľa v celom priestore. Žiaci sú vyzvaní nájsť takú hodnotu koncovej rýchlosti  $v_2$ , pri ktorej sa v poli *nešíri* žiaden rozruch.

1. Aký je význam sivého krúžku v animácii? Čo predstavuje?
2. Aký je význam čierneho krúžku v animácii? Čo predstavuje? Prečo z neho zdanlivo vychádzajú siločiar v bielej oblasti?

V pravej dolnej časti animácie sa nachádza posuvník, ktorým môžete meniť koncovú rýchlosť náboja a sledovať ako to ovplyvní obrazec siločiar. Uistite sa, že čas na animácii je  $ct = 1,10$  m. Ťahajte posuvníkom a sledujte ako sa mení obrazec siločiar. Potom splňte nasledujúcu úlohu:

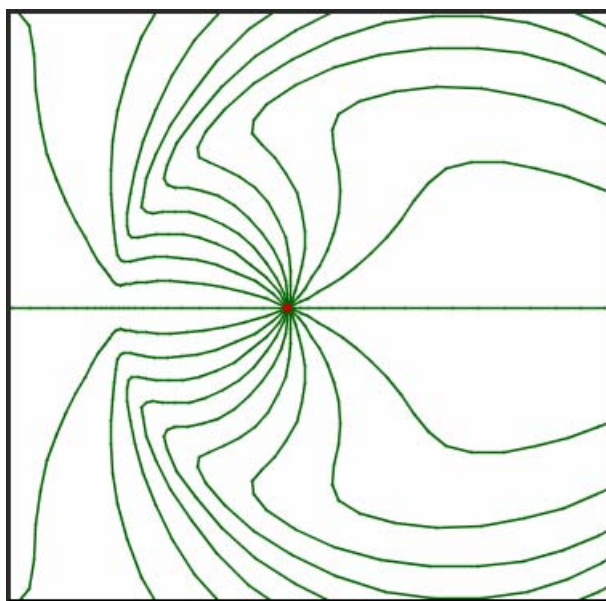
3. Umiestnite posuvník do takej polohy, aby sa v animácii po jej opätovnom spustení nešírila žiadna elektromagnetická vlna! (t.j. aby neboli siločiar nijako porušené) Akú hodnotu ukazuje vtedy posuvník rýchlosti  $v_2$ ? Stlačte RESET a spusťte animáciu od začiatku s takto nastavenou hodnotou posuvníka rýchlosti. Aký pohyb vykonával počas celej animácie náboj?

Ak náboj pri svojom pohybe zmení rýchlosť, bude sa od miesta zmeny rýchlosti v elektrickom poli náboja šíriť rozruch a vznikne elektromagnetické vlnenie.

Ak na druhej strane náboj pri svojom pohybe rýchlosť nezmení, nevznikne žiadna porucha v elektrickom poli náboja a nevznikne ani elektromagnetické vlnenie.

**Elektrické pole harmonicky kmitajúceho náboja**

Animácia na Obrázku 2.14 znázorňuje prípad elektrického poľa náboja, ktoré vznikne, keď sa náboj pohybuje po vodorovnej priamke harmonickým kmitavým pohybom, pri ktorom mení rýchlosť neustále.



Obr. 2.14: Animácia elektrického poľa náboja vykonávajúceho harmonický kmitavý pohyb po vodorovnej priamke. Animáciu je možné vidieť v pohybe len na webových stránkach [3].

Na prvý pohľad je vidieť, že siločiaru nie sú zalomené ako v prípade pulzu, ale sú hladké. Pole elektromagnetickej vlny je rozprestrené do celého priestoru a nenachádza sa tak ako to bolo v prípade elektromagnetickeho pulzu len v úzkom žltom medzikruží.

Ak sa chcete s týmto typom elektromagnetickeho vlnenia pohrať viac, stiahnite si tento Java program (12,8 KB) a použite ho na samostatnú výskumnú prácu.

**Test G1**

V ktorých z nasledujúcich situácií bude vznikáť elektromagneticke vlnenie?

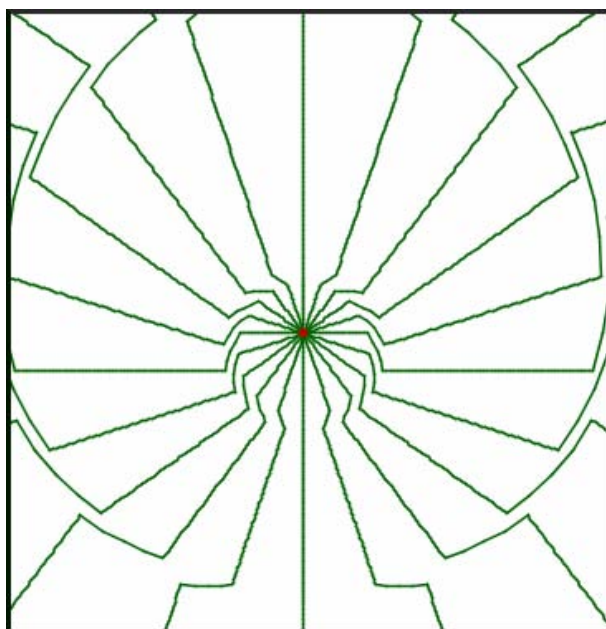
- A) elektrický náboj sa pohybuje rovnomerným priamočiarym pohybom

Tu samostatnú prácu žiakov pri počítačoch prerušíme dvoma testami.

- B) elektrický náboj sa pohybuje rovnomerným pohybom po kružnici
  - C) rovnomerne priamočiarno sa pohybujúci elektrický náboj zrazu zastaví
  - D) elektrický náboj je v pokoji
  - E) elektrický náboj sa pohybuje rovnomerne zrýchleným priamočiarym pohybom
  - F) elektrický náboj sa pohybuje harmonickým kmitavým pohybom
- a) len C
  - b) len C a F
  - c) len C, E a F
  - d) len B, C, E a F

**Test G2**

Vyberte tú možnosť, ktorá najlepšie popisuje pohyb náboja, ktorý vytvoril pole na obrázku:



- a) Náboj kmitá harmonickým pohybom vo zvislom smere.



- b) Náboj sa pružne odráža medzi dvoma miestami vo vodorovnom smere.
- c) Náboj sa pružne odráža medzi dvoma miestami vo zvislom smere.
- d) Náboj najprv z pokoja zrýchli na nejakú rýchlosť, ktorou sa chvíľu pohybuje a potom zrýchli na ešte väčšiu rýchlosť v tom istom smere.

### 2.2.3 H – Intenzita elektrického poľa elektromagnetického pulzu

V programe si navoľte **Animáciu 7**. V tejto animácii budete skúmať vektor intenzity elektrického poľa elektromagnetického pulzu. Náboj bude mať opäť nulovú počiatočnú rýchlosť. Sústreďte sa len na jednu jeho siločiaru. Zistíte ako vyzerá vektor intenzity elektrického poľa prislúchajúci siločiare vnútri žltej oblasti a rozložíte si ho na zložky. Tiež preskúmate ako závisia veľkosti týchto zložiek od vzdialenosti  $r$  od počiatku sústavy súradníc, t.j. od miesta, v ktorom došlo k zmene rýchlosti.



#### Úloha H1 – Zložky elektrického poľa

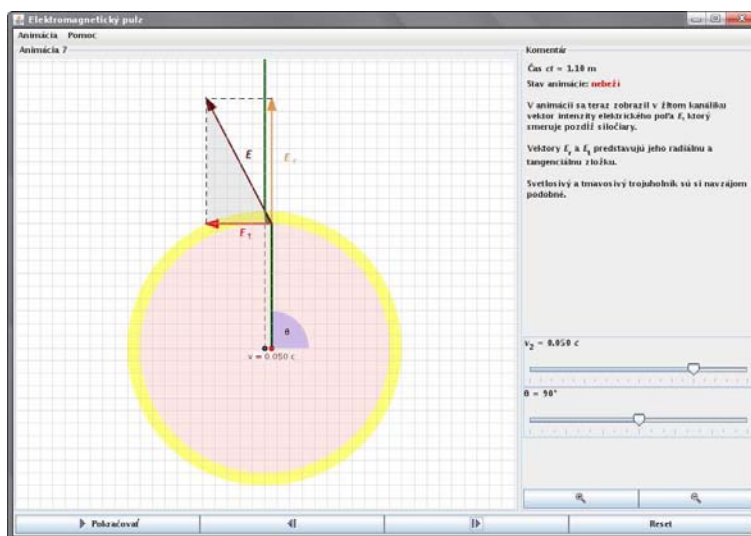
Spusťte animáciu a sledujte pozorne jednotlivé fázy pohybu náboja. Animácia sa automaticky zastaví v čase  $ct = 1, 10m$ . Vtedy sa zobrazí vektor intenzity  $\vec{E}$  elektrického poľa na vnútornej hranici vnútri žltej oblasti, ktorý **má smer siločiar** v žltej oblasti. Žltá oblasť je veľmi tenká oproti vzdialenosti od počiatku sústavy súradníc a tak môžete predpokladať, že všetky jej body sú od počiatku sústavy súradníc približne rovnako ďaleko. Preto predpokladajte, že v celej žltej oblasti má vektor  $\vec{E}$  približne rovnakú veľkosť.

Okrem vektora  $\vec{E}$  zobrazuje animácia aj jeho radiálnu zložku  $\vec{E}_r$  a tangenciálnu (priechnu) zložku  $\vec{E}_t$ .

**Radiálna zložka poľa  $\vec{E}_r$**  nie je nič iné ako intenzita elektrostatického poľa, o ktorej už vieme, že klesá s druhou mocninou vzdialenosti od náboja. Existuje nielen v žltej oblasti, ale v celom priestore. Zložka intenzity  $\vec{E}_r$  preto **nepredstavuje elektromagnetickú vlnu**. Klesá veľmi rýchlo a vo väčších vzdialenostiach od náboja bude úplne zanedbateľná.

Na rozdiel od toho **tangenciálna zložka poľa  $\vec{E}_t$**  je pre nás niečo úplne nové. Takúto zložku obyčajné elektrostatické pole kladného náboja nemalo! Práve ona **je zložkou elektrického poľa elektromagnetickej vlny**. Ako uvidíme, táto zložka klesá omnoho pomalšie ako radiálna zložka.

Doteraz by mali mať žiaci základnú kvalitatívnu predstavu o tom, ako vznikajú elektromagnetické vlny a aké majú vlastnosti. Táto časť poslúži na kvalitatívnu prípravu na odvodenie vzťahu pre veľkosť tangenciálnej zložky elektrického poľa elektromagnetického pulzu.



Obr. 2.15: Animácia 7 v čase  $ct = 1,10$  m. Znázornená je jediná siločiaru elektrického poľa, ktorá má pred aj po zrýchlení náboja smer zvislo nahor. Okrem toho je znázornený vektor elektrického poľa prislúchajúci siločiare v žltej oblasti a jeho zložky  $\vec{E}_r$  a  $\vec{E}_t$ .



### Úloha H2 – Závislosť zložiek poľa od $r$

Pomocou programu teraz zistíte, ktorá zložka elektrického poľa pulzu,  $\vec{E}_r$  alebo  $\vec{E}_t$ , klesá s rastúcou vzdialenosťou od počiatku sústavy súradníc pomalšie. Potom doplňte nasledujúcu vetu.

Pri tom ako sa elektromagnetický pulz zväčšuje, klesá zložka poľa  $\vec{E}_t$   ako zložka  $\vec{E}_r$ .



### Úloha H3 – Závislosť veľkosti zložky $\vec{E}_t$ od uhla siločiar s kladným smerom vodorovnej osi $x$

Stlačte tlačidlo RESET a znovu spustíte animáciu. Nechajte ju dobehnúť po čas  $ct = 1,1m$ , v ktorom sa sama zastaví.

Meňte postupne pomocou posuvníka pre uhol  $\theta$  uhol siločiar s kladným smerom vodorovnej osi  $x$  a sledujte dĺžku zložky poľa  $\vec{E}_t$  zodpovedajúcu ako už vieme poľu elektromagnetickej vlny. Doplňte potom nasledujúce vety:

Pri zväčšovaní uhla  $\theta$  od počiatkovej hodnoty 0 po hodnotu 90 zložka  $\vec{E}_t$  . Pri ďalšom zväčšovaní uhla  $\theta$  od hodnoty

90 po hodnotu 180 zložka  $\vec{E}_t$  . Najväčšiu veľkosť mala zložka  $\vec{E}_t$  pre uhol  $\theta =$  . Najmenšiu veľkosť mala pre hodnoty uhla  $\theta =$  .



#### Úloha H4 – Závislosť $E_t$ od zrýchlenia náboja

Nastavte hodnotu uhla  $\theta = 90^\circ$ . Teraz pomocou posuvníka koncovej rýchlosti  $v_2$  postupne mente koncovú rýchlosť. Uvedomte si, že zmenou rýchlosti  $v_2$  meníte vlastne zrýchlenie náboja

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\tau} = \frac{v_2 - 0}{\tau} = \frac{v_2}{\tau}$$

Meňte rýchlosť  $v_2$  v celom povolenom rozsahu a doplňte nasledujúce vety:

S rastúcim kladným zrýchlením náboja sa veľkosť zložky  $\vec{E}_t$    
a zložka má smer  ako zrýchlenie.

S klesajúcim záporným zrýchlením náboja sa veľkosť zložky  $\vec{E}_t$   
 a zložka má smer  ako zrýchlenie.

Zložka  $\vec{E}_t$  má nulovú veľkosť ak zrýchlenie náboja je .

Na nasledujúcej stránke všetky doterajšie úvahy zovšeobecnieme a zhrnieme.

## 2.3 4. hodina

### 2.3.1 I – Odvodenie vzťahu pre veľkosť intenzity poľa elektromagnetického pulzu

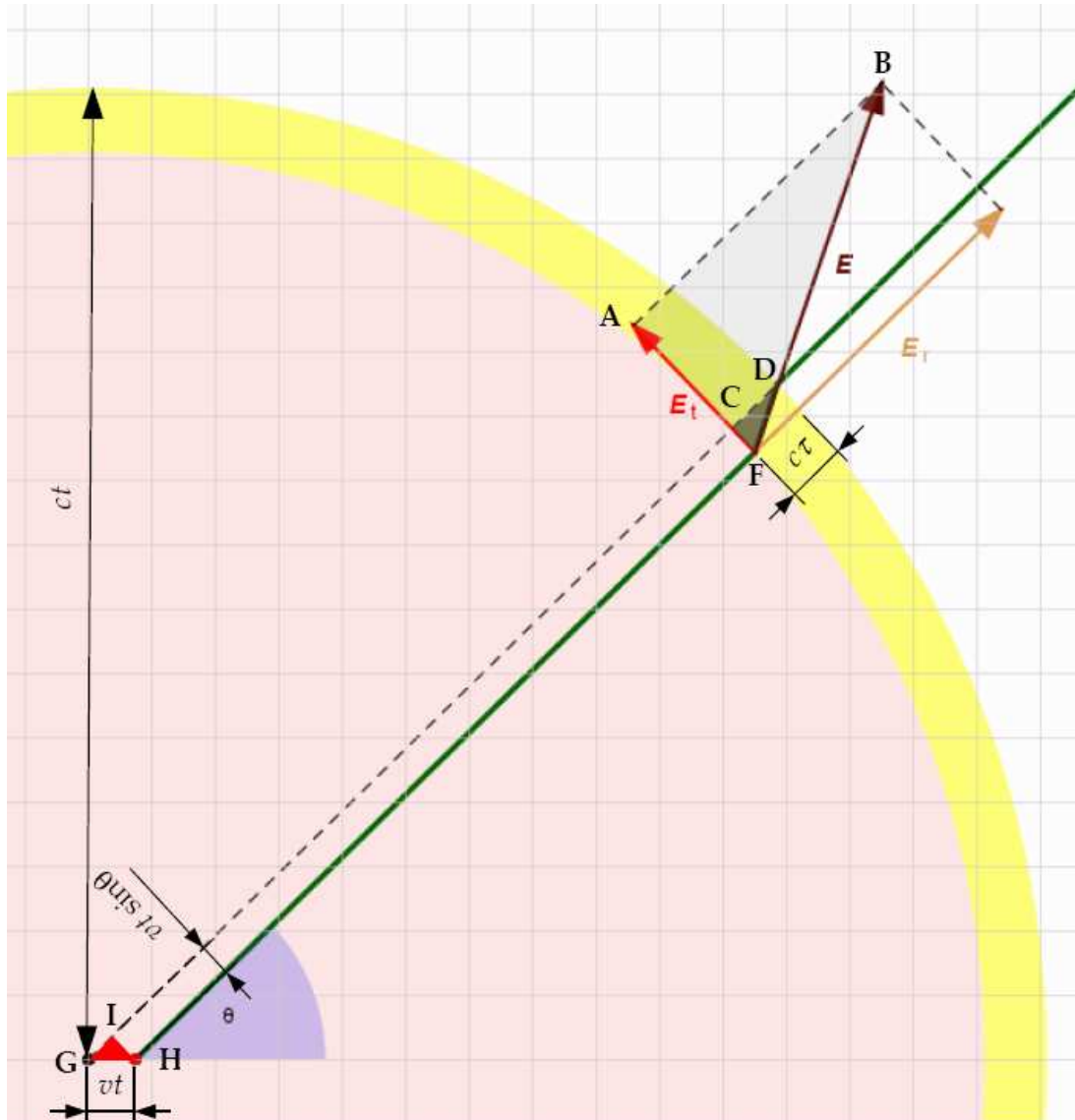
Uvažujme teraz znovu jednu siločiaru elektrického náboja z **Animácie 7** zvierajúcu s osou  $x$  uhol  $\theta$ , znázornenú na Obrázku 2.16. Predpokladajme, že  $v \ll c$  a že  $r \gg c\tau$ .

Vektor intenzity má smer siločiar v žltom kanáliku. Jeho radiálna zložka  $E_r$  má v každom bode žltej oblasti približne rovnakú veľkosť

$$E_r = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \quad (2.1)$$

zodpovedajúcu elektrostatickému poľu náboja  $q$ . Určíme teraz jeho tangenciálnu zložku  $E_t$  v žltej oblasti.

Táto časť je oproti predchádzajúcim častiam náročnejšia. Je možné ju chápať ako rozširujúce učivo a učiteľ si môže vybrať, či ju zo žiakmi vôbec chce prebrať. Táto hodina prebieha znovu s celou triedou formou prednášky a využívajú sa výsledky, ktoré žiaci získali na cvičení.



Obr. 2.16: Jedna siločiaru náboja  $q$  po zmene jeho rýchlosti. Vektory  $\vec{E}$ ,  $\vec{E}_r$  a  $\vec{E}_t$  označujú intenzitu elektrického poľa v žltej oblasti a jej radiálnu a tangenciálnu zložku.

Trojuholníky  $FAC$  a  $FCD$  na obrázku sú si navzájom podobné. Vďaka tomu môžeme využiť, že majú rovnaké pomery navzájom si zodpovedajúcich strán, teda že

$$\frac{|AF|}{|AB|} = \frac{E_t}{E_r} = \frac{|CF|}{|CD|}$$

Preto

$$E_t = E_r \frac{|CF|}{|CD|} \quad (2.2)$$

Ak teda chceme určiť  $E_t$ , potrebujeme poznať dĺžky strán  $|CF|$  a  $|CD|$ . Dĺžka  $|CD|$  je šírka žltej oblasti, teda

$$|CD| = c\tau \quad (2.3)$$

Zostáva dĺžka  $|CF|$ . Keďže dĺžka  $|CF| = |IH|$ , môžeme na vyjadrenie  $|CF|$  využiť pravouhlý trojuholník  $HIG$ . Platí preň, že

$$\sin \theta = \frac{|IH|}{|GH|}$$

Ak zanedbáme maličkú dráhu, ktorú prešiel náboj pri rovnomernom zrýchľovaní, môžeme pre  $|GH|$  písať  $|GH| \approx vt$ . Preto

$$|IH| = |CF| = |GH| \sin \theta = vt \sin \theta \quad (2.4)$$

Vráťme sa ku vzťahu (2.2) a využime vzťahy (2.1), (2.3) a (2.4):

$$E_t = E_r \frac{vt \sin \theta}{c\tau} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{at \sin \theta}{c} \quad (2.5)$$

Využili sme pri tom, že  $\frac{v}{\tau} = a$ . Ak ešte využijeme, že  $t \approx \frac{r}{c}$ , môžeme rovnicu (2.5) upraviť na tvar

$$E_t = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{ar \sin \theta}{c^2}$$

a po vykrátení  $r$  na koncový tvar

$$E_t = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{a \sin \theta}{r} \quad (2.6)$$

Zložka  $\vec{E}_t$  predstavuje intenzitu elektrického poľa elektromagnetického pulzu. Ako je vidieť zo vzťahu (2.6),  $E_t$  klesá naozaj s prvou mocninou vzdialenosti, teda pomalšie ako intenzita elektrostatického poľa. Okrem toho vzťah (2.6) ukazuje, že intenzita elektrického poľa pulzu je priamoúmerná zrýchleniu náboja. A tiež aj to, že závisí od smeru. Najväčšia je pre  $\theta = 90^\circ$ , najmenšia pre  $\theta = 0^\circ$  alebo  $\theta = 180^\circ$ .

**Test I1**

V rozhlasovej vysielacej anténe v tvare dlhej tyče sa pôsobením vysokofrekvenčného generátora striedavého prúdu pohybujú kmitavým pohybom *pozdĺž antény* elektróny. Tento pohyb je zrýchlený a ako už vieme, vedie ku vzniku elektromagnetického vlnenia. Ako treba umiestniť anténu, aby sa vlnenie šírilo čo najefektívnejšie pozdĺž zemského povrchu?

- a) v smere rovnobežnom so zemským povrchom
- b) v smere zvierajúcom uhol 45 so zemským povrchom
- c) v smere kolmom na zemský povrch

# Literatúra

- [1] Lepil O., Houdek V., Pecho A.: *Fyzika pre 3. ročník gymnázia*. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo 1994, s. 192-213.
- [2] Pišút J. a kol.: *Fyzika pre 4. ročník gymnázia*. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo 1994, s. 35-67.
- [3] Tuleja, S.: *Elektromagnetické vlnenie* [online]. [cit. 2007-09-14]. Dostupné na internete: <http://vk.upjs.sk/~tuleja/vscience/materialy/elmag/index.html>.
- [4] Tuleja, S.: *Virtuálne laboratórium fyziky a matematiky* [online]. [cit. 2007-09-14]. Dostupné na internete: <http://vk.upjs.sk/~tuleja/index.htm>.
- [5] Wheeler, J. A.: *A Journey into Gravity and Spacetime*. New York: Scientific American Library 1999.
- [6] Ohanian, H. C.: *Electromagnetic radiation fields: A simple approach via field lines*. In: Am. J. Phys., roč. 48, február 1980, č. 2, s. 170-171.